

一种基于虚拟矢量的模糊无权重系数改进 模型预测转矩控制

张 涛*, 孙全增, 高梓伦, 李争国, 张志锋
(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

An Improved Model Predictive Torque Control with Fuzzy Unweighted Factor Based on Virtual Vectors

ZHANG Tao*, SUN Quanzeng, GAO Zilun, LI Zhengguo, ZHANG Zhifeng
(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the problems of designing and tuning the weighting factors of the model predictive torque control (MPTC) of dual three-phase permanent magnet synchronous motor (DTP-PMSM) and the high harmonic currents in the x - y plane, an improved MPTC method with fuzzy unweighted factor based on virtual vectors was proposed. [Methods] Firstly, the tracking errors of torque and flux linkage were constrained by fuzzy dynamic boundary conditions, respectively, and the selection of voltage vectors was carried out under the constraint boundaries. The selected voltage vectors were required to keep the tracking errors of the torque and flux linkage within the boundary conditions, respectively. The two sets of vectors that meet the two boundary conditions were intersected according to set rules to select the optimal vector. Secondly, a set of virtual voltage vectors synthesized from four vectors was introduced as an alternative set of vectors to suppress the harmonic currents of the system. Finally, the improved MPTC proposed in this paper was compared and analyzed with the traditional MPTC, virtual vector-based MPTC and relative error rate cost function-based MPTC through simulation. [Results] The simulation results showed that compared with the traditional MPTC, virtual vector-based MPTC and relative error rate cost function-based MPTC, the total harmonic distortion of phase current of the improved MPTC proposed in this paper was reduced by 87.53%, 26.57% and 35.05%, respectively. The root mean square error of flux linkage ripple was reduced by 69.23%, 50% and 20%, and the root mean square error of torque ripple was reduced by 6.15%, 4.95% and 3.89%,

respectively. The regulation time at load start-up was reduced by 15.7%, 22.9% and 44.8%, respectively, with smaller steady-state error and faster response. [Conclusion] The control method proposed in this paper not only achieves effective control of torque and flux linkage in DTP-PMSMs, but also eliminates the uncertainty introduced by the weighting factor, improves the dynamic performance of the system, and effectively suppresses the harmonic currents in the x - y plane, which has good feasibility.

Key words: dual three-phase permanent magnet synchronous motor; model predictive torque control; weighting factor; fuzzy control; virtual voltage vector

摘 要: 【目的】针对双三相永磁同步电机(DTP-PMSM)模型预测转矩控制(MPTC)的权重系数的设计整定和 x - y 平面的高次谐波电流的问题,提出一种基于虚拟矢量的模糊无权重系数改进MPTC方法。【方法】首先,用模糊动态的边界条件分别对转矩和磁链跟踪误差进行约束,在约束边界下进行电压矢量的选择,被选择的电压矢量需要分别使转矩和磁链跟踪误差保持在边界条件内。将符合两个边界条件的两个矢量集合按照设定的规则进行交集处理,以选择最优矢量。然后,引入由四矢量合成的虚拟电压矢量集作为备选矢量集合,对系统的谐波电流进行抑制。最后,通过仿真将本文所提改进MPTC与传统MPTC、基于虚拟矢量的MPTC以及基于相对误差率代价函数的MPTC进行对比分析。【结果】仿真结果表明,相较于传统MPTC、基于虚拟矢量的MPTC以及基于相对误差率代价函数的MPTC,本文所提改进MPTC的相电流总谐波失真分别下降了87.53%、26.57%和35.05%,磁链脉动均方根误差分别降低了69.23%、50%和20%,转矩脉动均方根误差分别降低了6.15%、4.95%和3.89%,负载启动时的调节时间分别降低了15.7%、22.9%和44.8%,稳态误

基金项目: 国家自然科学基金项目(61603263)

National Natural Science Foundation of China (61603263)

差更小,响应更快。【结论】本文所提控制方法不仅实现了对 DTP-PMSM 转矩和磁链的有效控制,还消除了权重系数带来的不确定性,提升了系统的动态性能,同时有效抑制了 x - y 平面上的谐波电流,具有良好的可行性。

关键词: 双三相永磁同步电机;模型预测转矩控制;权重系数;模糊控制;虚拟电压矢量

0 引言

近些年来,双三相永磁同步电机(Dual Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor, DTP-PMSM)以其转矩脉动小、高效率、高可靠性以及控制自由度高等特点,被广泛应用于航空航天、医疗、船舶、汽车和工业电子等各个领域^[1-4]。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)应用在电机控制领域,提供高质量的动态响应和跟踪性能,通过优化控制输入,使得电机控制系统在面对非线性、时变、多变量和多约束条件的系统时表现出色^[5-6]。MPC 能够在统一的框架内综合考虑多种控制目标,如效率优化、转矩控制和电流谐波抑制等,有利于实现系统的整体优化设计^[7-11]。目前,DTP-PMSM 的 MPC 策略主要有模型预测电流控制(Model Predictive Current Control, MPCC)和模型预测转矩控制(Model Predictive Torque Control, MPTC)。MPTC 基于电机的数学模型来预测未来的转矩和磁链状态,并通过滚动优化策略选择最优的控制输入,实现对电机性能的精确控制^[12-16]。传统 MPTC 的价值函数由定子磁链误差项和转矩误差项构成,因此其价值函数需要依靠权重系数来避免二者的幅值和单位不同对电机控制性能的影响。试凑法是整定权重系数的常用方法,但是在操作过程中该方法不仅复杂繁琐,还严重依赖于主观经验,在参数失配情况下,不准确的整定结果会影响电机的运行性能^[17-18]。

文献[19]提出了一种基于模糊排序法的 MPTC 策略,实现了缩放因子的动态优化,其价值函数包含了转矩磁链和开关次数,仍需权重系数。文献[20]基于级联法将多目标价值函数并联形式转换为单目标价值函数的级联形式,消除了权重系数,但是过程较为复杂,分级较多。文献[21]提出了一种基于等效三矢量模型的占空比重构电流预测控制方法,该方法消除了枚举过程,

但是计算难度较大。文献[22]提出了一种简单的估计方法来推导电机的局部数据驱动模型,避开了权重系数的确定,但是模型推导较为复杂。文献[23]把传统价值函数中转矩、定子磁链幅值的控制统一转化为定子磁链矢量的控制,避免了传统价值函数中权重系数的设计与整定,但是该策略的鲁棒性较差。文献[24]通过无差拍直接转矩和磁链控制预测出参考矢量的角度位置和幅值信息,避免了权重系数的选取,通过一种简化的矢量幅值调整方法使该最优虚拟矢量的幅值大小无限逼近参考矢量幅值大小,但是过程复杂。文献[25]在多标量模型的基础上直接预测转矩及其对偶量,磁链和定子电流的内积和外积具有相同的单位和量纲,因此价值函数的设计不需要权重系数,但是模型计算精度有所下降。

为消除权重系数、抑制系统的电流谐波,本文提出了一种基于虚拟矢量的模糊无权重系数的改进 MPTC 模型。采用四矢量合成虚拟电压矢量,构成一个含 12 个虚拟矢量的备选矢量集合,有效抑制了电流谐波。然后通过对转矩和磁链跟踪误差的边界约束,分别选出满足边界条件的矢量集合。利用模糊控制对边界进行动态调整,保证系统的动态性能。将选出来的矢量集合进行交集后选出其中最优的电压矢量,消除了权重系数,同时保留传统预测模型动态响应快的特点。

1 DTP-PMSM 传统 MPTC

1.1 DTP-PMSM 数学模型

本文所研究的 DTP-PMSM 为表贴式电机,基于矢量空间解耦(Vector Space Decoupling, VSD)坐标变换的两相旋转坐标系,可以得到电压基本方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega_e Li_q \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega_e (Li_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别 d 、 q 轴电压和电流; ψ_f 为永磁体磁链; ω_e 为电机电角速度; R 、 L 分别为定子电阻、电感。

通过向前欧拉方程将式(1)离散化,可得到电流预测方程为

$$\begin{cases} i_d(k) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_d(k-1) + \frac{T}{L} u_d(k-1) + T\omega_e i_q(k-1) \\ i_q(k) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_q(k-1) + \frac{T}{L} u_q(k-1) - T\omega_e i_d(k-1) - T \frac{\psi_f \omega_e}{L} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_d(k)$ 、 $i_q(k)$ 和 $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 分别为 k 时刻的 d 、 q 轴电流和电压; $i_d(k-1)$ 、 $i_q(k-1)$ 和 $u_d(k-1)$ 、 $u_q(k-1)$ 分别为 $k-1$ 时刻的 d 、 q 轴电流和电压; T 为采样周期。

由于控制系统实现控制算法需要进行采样、计算等过程,产生了一拍延时,对系统的控制性能影响较大,因此有必要进行一拍延时补偿。初始阶段利用 $k-1$ 时刻的定子电流测量值及电机参数,预测出 k 时刻 d - q 坐标系下的定子电流。继而根据式(2)继续处理得到式(3):

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_d(k) + \frac{T}{L} u_d(k) + T\omega_e i_q(k) \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{TR}{L}\right) i_q(k) + \frac{T}{L} u_q(k) - T\omega_e i_d(k) - T \frac{\psi_f \omega_e}{L} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)计算出 $k+1$ 时刻的 d 、 q 轴预测电流,从而进一步得到 $k+1$ 时刻的电磁转矩和定子磁链的预测值 $T_e(k+1)$ 、 $\psi_s(k+1)$:

$$T_e(k+1) = 3P_n [i_q(k+1)\psi_d - i_d(k+1)\psi_q] \quad (4)$$

$$\psi_s(k+1) =$$

$$\sqrt{[Li_d(k+1) + \psi_f]^2 + [Li_q(k+1)]^2} \quad (5)$$

式中: ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链分量; P_n 为电机极对数。

1.2 传统价值函数

传统 MPTC 以最小化磁链及电磁转矩跟踪误差为控制目标,其价值函数如式(6)所示:

$$g = [T_e^* - T_e(k+1)]^2 + A[\psi_s^* - \psi_s(k+1)]^2 \quad (6)$$

式中: A 为权重系数,初步确定值设计为 $A =$

$T_e^* / |\psi_s^*|$; T_e^* 为额定状态下的电磁转矩,其由外部转速环的比例环节输出得到; ψ_s^* 为额定状态下的定子参考磁链幅值,其由式(7)得到:

$$\psi_s^* = \sqrt{\psi_f^2 + \left(L \frac{2T_e^*}{3P_n \psi_f}\right)^2} \quad (7)$$

按照式(6)得到的权重系数只能作为初始值,在实际应用中仍然需要通过试凑法对权重系数进行调整,比较依赖经验,过程较为繁琐。然后将候选矢量集的电压矢量逐一代入式(1)~式(5)中,将预测的转矩值和磁链值代入式(6)中计算出对应的 g ,取得使 g 最小的电压矢量作用于逆变器,完成对转矩和磁链的有效控制。

为了消除权重系数,将控制目标转矩和磁链统一到相同的数量级上。将转矩和磁链转化为相对误差率的形式,控制目标改为转矩误差和磁链误差与各自参考值的比值^[26],如式(8)所示:

$$g = \sqrt{\left[\frac{T_e^* - T_e(k+1)}{T_e^*}\right]^2 + \left[\frac{\psi_s^* - \psi_s(k+1)}{\psi_s^*}\right]^2} \quad (8)$$

2 四矢量虚拟电压矢量合成

DTP-PMSM 逆变器可产生 64 个电压矢量,其在 α - β 平面、 x - y 平面的分布分别如图 1、图 2 所示。64 个电压矢量包括 60 个基本电压矢量和 4 个零矢量,在 α - β 平面将 60 个基本电压矢量按幅值分为 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 四组。

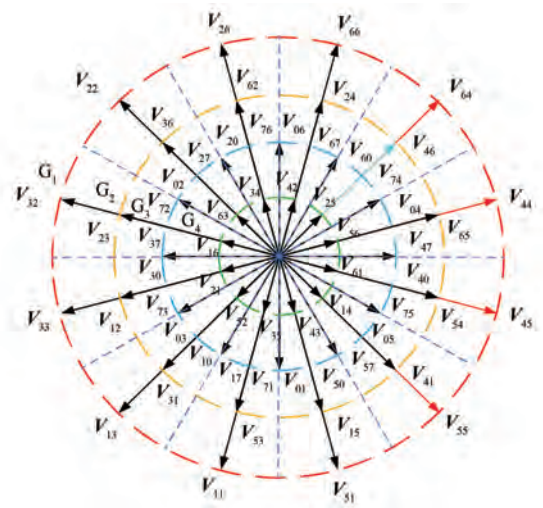
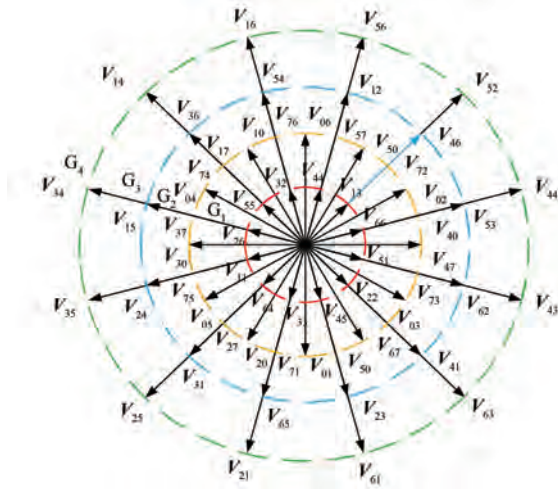


图1 α - β 平面电压矢量分布

Fig. 1 Voltage vector distribution in the α - β plane

图 2 x - y 平面电压矢量分布Fig. 2 Voltage vector distribution in the x - y plane

为了抑制 x - y 平面上的谐波电流。研究 G_1 组矢量可知, G_1 组矢量在 α - β 平面的电压幅值最大, 且在 x - y 平面的电压幅值最小, 为了保证电压利用率, 本文采用 G_1 组矢量进行虚拟矢量合成, 可用四个相邻矢量合成, 其在 x - y 平面的电压矢量方向相反, 相互抵消。具有减少谐波电流的电压矢量分布如图 3 所示。

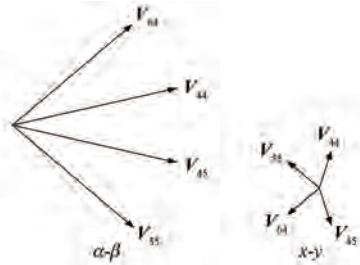


图 3 四矢量合成的电压矢量分布

Fig. 3 The distribution of synthetic voltage vector of four vectors

由图 3 可知, V_{44} 、 V_{45} 、 V_{55} 和 V_{64} 通过组合和设定一定的占空比可使其在 x - y 平面的合成电压矢量的值为零。利用, V_{44} 、 V_{45} 、 V_{55} 和 V_{64} 来合成虚拟电压矢量 VV_1 , 其幅值表达式为

$$\begin{cases} |VV_1|_{\alpha\beta} = \lambda_1 |V_{44}|_{\alpha\beta} + \lambda_2 |V_{45}|_{\alpha\beta} + \lambda_3 |V_{55}|_{\alpha\beta} + \lambda_4 |V_{64}|_{\alpha\beta} \\ |VV_1|_{xy} = \lambda_1 |V_{44}|_{xy} + \lambda_2 |V_{45}|_{xy} - \lambda_3 |V_{55}|_{xy} - \lambda_4 |V_{64}|_{xy} \end{cases} \quad (9)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 分别为 V_{44} 、 V_{45} 、 V_{55} 、和 V_{64} 作用时间的占空比; $|VV_1|_{\alpha\beta}$ 、 $|VV_1|_{xy}$ 分别为 VV_1 在 α - β 平面、 x - y 平面上的幅值。

根据虚拟电压矢量 VV_1 在 x - y 平面的电压值为零, 有:

$$\begin{cases} |VV_1|_{xy} = 0 \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1 \\ \lambda_1 = \lambda_2, \lambda_3 = \lambda_4 \end{cases} \quad (10)$$

求解得:

$$\begin{cases} |VV_1|_{\alpha\beta} = 0.574U_{dc} \\ \lambda_1 = \lambda_2 = 0.366 \\ \lambda_3 = \lambda_4 = 0.134 \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_{dc} 为逆变器直流母线电压。

利用 G_1 组矢量可合成 12 个虚拟电压矢量, 具体分布如图 4 所示。以 VV_1 为例, 虚拟电压矢量的脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 信号产生过程如图 5 所示。

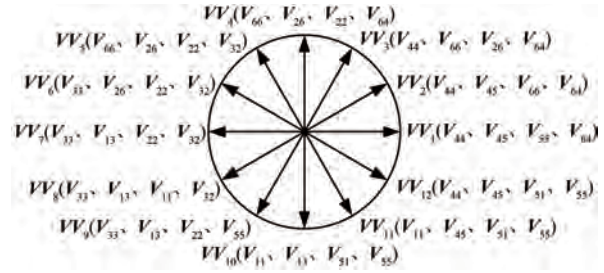


图 4 虚拟电压矢量分布图

Fig. 4 Distribution of virtual voltage vectors

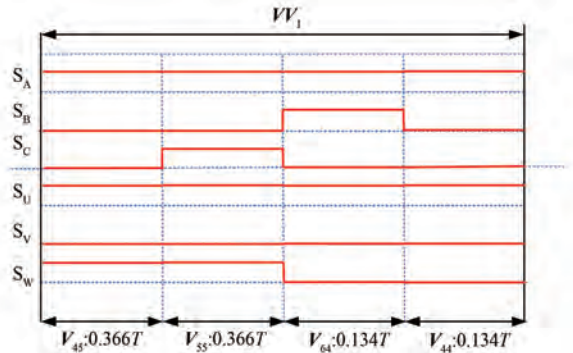


图 5 虚拟电压矢量 PWM 信号的产生过程

Fig. 5 Virtual voltage vector PWM signal generation process

3 动态模糊无权重系数控制策略

通过试凑法确定 MPTC 权重系数需要花费大量时间, 较为复杂。在多目标价值函数 MPTC 体系中, 权重系数的作用是调节转矩误差与磁链误差在控制中的相对重要性。在系统参数变动和其他容错情况下, 传统固定值的权重系数适应性不

够。本文引入一种动态模糊无权重系数控制策略,将MPTC中的多目标价值函数控制简化为并行的单目标价值函数,以确定电压矢量的选择。本文将转矩和磁链分开控制,将转矩和磁链的跟踪误差分别限制在对应的边界内,该边界条件由模糊算法进行动态调整,保证控制系统转矩和磁链的控制性能。所提动态模糊无权重系数MPTC结构框图如图6所示。采用矢量集 $\mathbf{VV}$ 和零矢量作为候选矢量集。图6中, g_{ti} 和 g_{tmin} 分别为候选矢量集中第 i 个矢量的预测转矩跟踪误差和对应的转矩约束边界; $g_{\psi i}$ 和 $g_{\psi min}$ 分别为候选矢量集中第 i 个矢量的预测磁链跟踪误差和对应的磁链约束边界; $T_e(k+1)_i$ 和 $\psi_s(k+1)_i$ 分别为候选矢量集中第 i 个矢量预测的 $k+1$ 时刻的转矩和磁链;

ω^* 和 ω_k 分别为给定的参考电角速度和 k 时刻的电角速度。

g_{ti} 和 $g_{\psi i}$ 表达式为

$$g_{ti} = |T_e^* - T_e(k+1)_i| \quad (12)$$

$$g_{\psi i} = |\psi_s^* - \psi_s(k+1)_i| \quad (13)$$

将 g_{ti} 与 g_{tmin} 进行比较,小于 g_{tmin} 的矢量归类到集合AT中;将 $g_{\psi i}$ 与 $g_{\psi min}$ 进行比较,小于 $g_{\psi min}$ 的矢量归类到集合BF中;其余矢量的归类到集合CF中。同时通过对约束边界的调控,使集合AT和BF的元素个数始终保持在3~5个,因为候选矢量太少或者太多时,系统的控制性能都不理想。如果不满足该条件,就对 g_{tmin} 、 $g_{\psi min}$ 进行模糊调控,保证最终选择的矢量作用后的控制性能最佳。

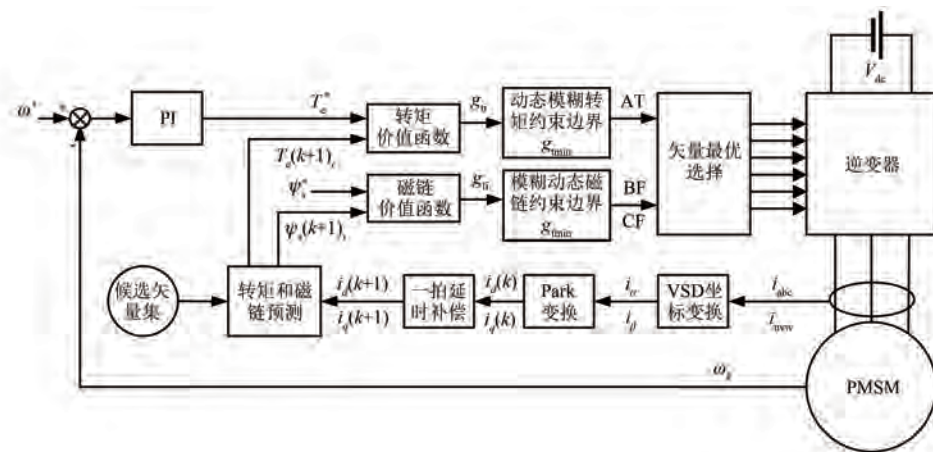


图6 动态模糊无权重系数MPTC结构框图

Fig. 6 Structural block diagram of dynamic fuzzy unweighted factor MPTC

对AT、BF和CF集合中的候选矢量进行筛选,选出最优电压矢量,在MPTC中,转矩控制的优先度大于磁链控制。最终的矢量选择可能情况如下。

(1)当集合AT和BF有交集时,选择交集中使转矩跟踪误差最小的电压矢量。

(2)当集合AT和BF无交集时,选择集合AT和CF的交集中使转矩跟踪误差最小的电压矢量。

(3)当集合AT和BF、CF均无交集时,选择集合AT中使转矩跟踪误差最小的电压矢量。

(4)当集合AT中无候选矢量时,选择候选矢量集中使转矩跟踪误差最小的电压矢量。

同时对约束边界进行动态调控。转矩约束边

界模糊控制定义为:集合AF的电压矢量个数 i_t 为输入量,转矩约束边界 g_{tmin} 为输出量,将输入量和输出量转化为模糊集合。磁链约束边界模糊控制定义为:集合BF的电压矢量个数 i_{ψ} 为输入量,磁链约束边界 $g_{\psi min}$ 为输出量,将输入量和输出量转化为模糊集合。

根据电机转矩和磁链脉动情况,设定初始转矩约束边界 g_{tmin} 为0.57 N·m,初始磁链约束边界 $g_{\psi min}$ 为0.000 5 Wb。

选定 i_t 的实际论域为[0, 13],分为七个模糊子集{N, VL, L, M, H, VH, A},其隶属度函数如图7所示。 g_{tmin} 的实际论域为[0 N·m, 2.3 N·m],分为七个模糊子集{VS, S, MS, M, MB, B, VB},其隶属度函数如图8所示。

选定 i_t 的实际论域为 $[0, 13]$, 分为七个模糊子集 $\{N, VL, L, M, H, VH, A\}$, 其隶属度函数如图 9 所示。 $g_{\min}$ 的实际论域为 $[0, 3.2e-3 \text{ Wb}]$, 分七个模糊子集 $\{VS, S, MS, M, MB, B, VB\}$, 其隶属度函数如图 10 所示。

制定的转矩约束边界模糊规则、磁链约束边界模糊规则分别如表 1、表 2 所示。

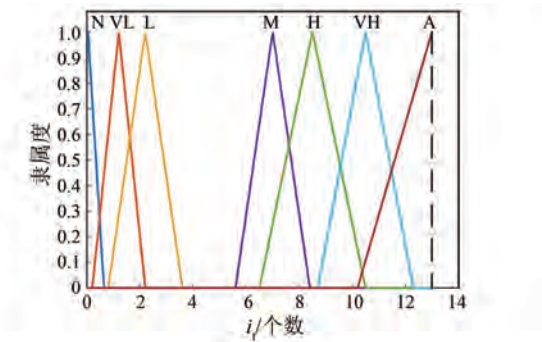


图 7 AF 集合的电压矢量个数隶属度函数

Fig. 7 The membership function of the number of voltage vectors of the AF set

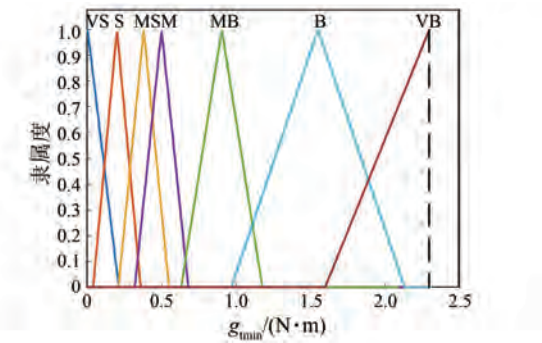


图 8 转矩约束边界隶属度函数

Fig. 8 The membership function of torque constraint boundary

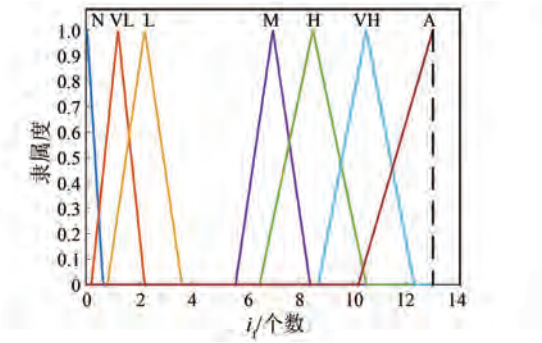


图 9 BF 集合的电压矢量个数隶属度函数

Fig. 9 The membership function of the number of voltage vectors of the BF set

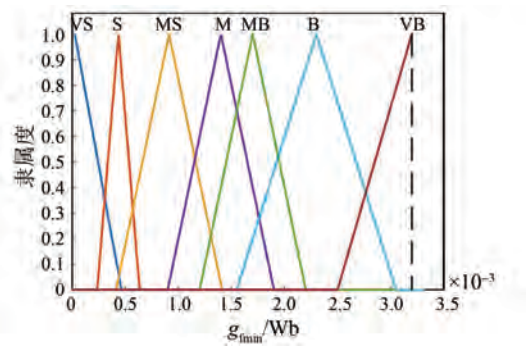


图 10 磁链约束边界隶属度函数

Fig. 10 The membership function of flux linkage constraint boundary

表 1 转矩约束边界模糊规则

Tab. 1 Torque constraint boundary fuzzy rules

AF 集合的电压矢量个数(输入)	转矩约束边界(输出)
N	VB
VL	B
L	MB
M	M
H	MS
VH	S
A	VS

表 2 磁链约束边界模糊规则

Tab. 2 Flux linkage constraint boundary fuzzy rules

BF 集合的电压矢量个数(输入)	磁链约束边界(输出)
N	VB
VL	B
L	MB
M	M
H	MS
VH	S
A	VS

4 仿真分析

为了验证所提方法的有效性, 本文基于 Matlab/Simulink 进行仿真, 分别对基于以 G_1 组矢量和零矢量为矢量控制集的传统 MPTC (MPTC1), 其权重系数 A 通过试凑法确定最佳为 39 000; 基于虚拟电压矢量集 VV 和零矢量的 MPTC(MPTC2), 其权重系数 A 通过试凑法确定最佳为 6 895; 基于虚拟电压矢量集 VV 和零矢量

的相对误差率代价函数 MPTC (MPTC3); 基于虚拟电压矢量集 $\mathbf{V}$ 和零矢量的模糊无权重系数的改进 MPTC (MPTC4) 四种控制方法进行对比分析。仿真中 DTP-PMSM 的主要参数如表 3 所示。

仿真工况设定为电机起动转速 400 r/min, 起动转矩 2 N·m, 在 0.25 s 时负载由 2 N·m 提升到 5 N·m。四种控制方法的仿真结果如图 11 所示, 对 0.25 s 后的稳态相电流进行快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析, 得到相电流总谐波失真 (Total Harmonic Distortion, THD) 如图 12 所示。

由图 11 可知, 起动时, MPTC1、MPTC2、MPTC3 和 MPTC4 控制系统达到稳态的时间分别为 0.021 6 s、0.023 6 s、0.033 s 和 0.018 2 s, 可见

本文所提 MPTC4 控制系统响应最快。

表 3 DTP-PMSM 主要参数

Tab. 3 DTP-PMSM main parameters

参数名称	参数值
额定功率/kW	0.5
额定电压/V	100
定子电阻/ Ω	1.096
转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.004
d 、 q 轴电感/mH	2.142
永磁体磁链/Wb	0.073 4
极对数	5
阻尼系数/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$)	0

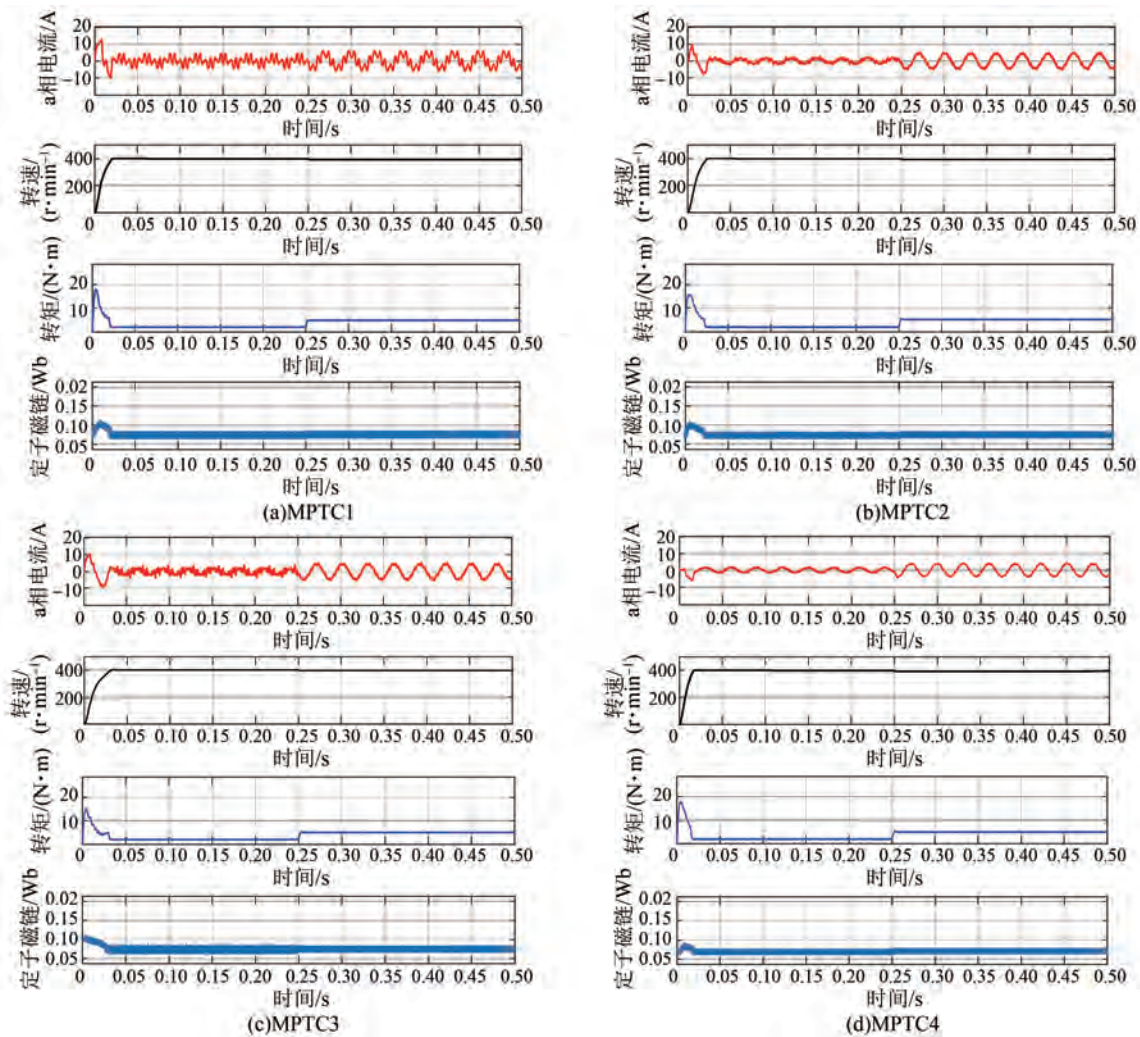


图 11 仿真结果

Fig. 11 Simulation results

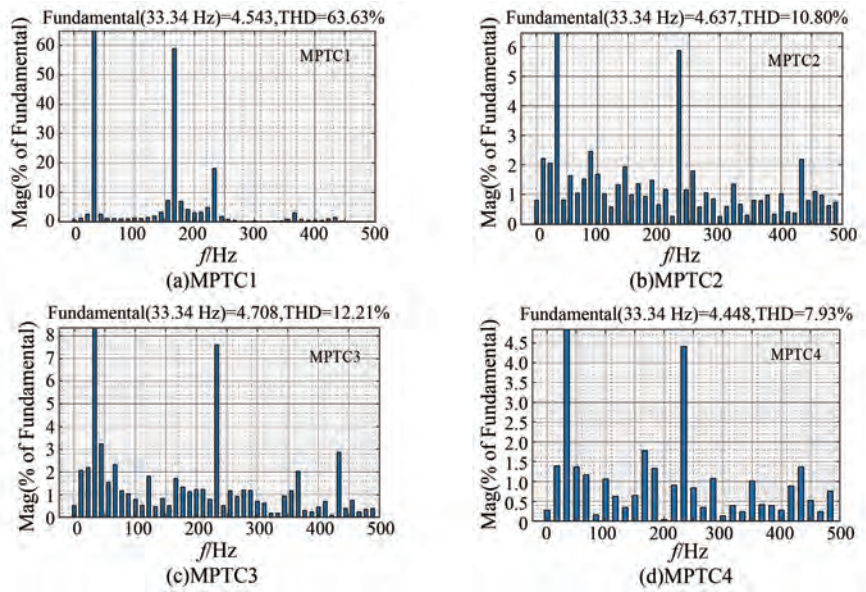


图 12 稳态电流 FFT 分析

Fig. 12 Steady-state current FFT analysis

为了对比四种控制方法对转矩和磁链的控制性能,定义转矩脉动均方根误差 T_{rip_RMSE} 和磁链脉动均方根误差 ψ_{rip_RMSE} 如式(14)和式(15)所示:

$$T_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (T_{ave} - T_m)^2} \quad (14)$$

$$\psi_{rip_RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{m=1}^n (\psi_{ave} - \psi_m)^2} \quad (15)$$

式中: T_{ave} 、 ψ_{ave} 分别为转矩、磁链的平均值; T_m 、 ψ_m 分别为转矩、磁链的实际值; n 为数据点个数。

稳态下,四种控制方法的控制性能对比如表 4 所示。

表 4 四种控制方法的控制性能对比

Tab. 4 Control performance comparison of four control methods

参数名称	控制方法			
	MPTC1	MPTC2	MPTC3	MPTC4
$T_{rip_RMSE}/(N \cdot m)$	0.055 3	0.054 6	0.054	0.051 9
ψ_{rip_RMSE}/Wb	0.001 3	0.000 8	0.000 5	0.000 4
THD/%	63.63	10.8	12.21	7.93
运行时间/ μs	204	175	177	234

由表 4 和图 12 可得,MPTC4 的相电流质量优于其他三种控制方法,THD 大幅降低,转矩和磁链的控制性能有较高提升,证明虚拟矢量对高次谐波有较好的抑制作用。相较于 MPTC1,

MPTC4 的 THD 降低了 87.53%, ψ_{rip_RMSE} 降低了 69.23%, T_{rip_RMSE} 降低了 6.15%;相较于 MPTC2,MPTC4 的 THD 降低了 26.57%, ψ_{rip_RMSE} 降低了 50%, T_{rip_RMSE} 降低了 4.95%;相较于 MPTC3,MPTC4 的 THD 降低了 35.05%, ψ_{rip_RMSE} 降低了 20%, T_{rip_RMSE} 降低了 3.89%。但 MPTC4 的运行时间比其他三种控制方法长,这是因为消除权重系数后,需进行交集择优,以选取最优电压矢量。

5 结语

本文提出了一种基于虚拟矢量的 DTP-PMSM 模糊无权重系数 MPTC 策略,成功解决了权重系数难以确定的问题。同时利用模糊控制,有效保证了约束边界动态跟随电机的工作状态,较传统 MPTC、基于虚拟矢量的 MPTC 和基于相对误差率代价函数的 MPTC,磁链和转矩的控制性能都得到了大幅度提升。利用四矢量合成的虚拟矢量作为控制集,有效抑制了 x - y 平面上的谐波电流。所提策略在保证转矩的控制效果下,较传统 MPTC 的 THD 降低了 87.53%,较基于虚拟矢量的 MPTC 的 THD 降低了 26.57%,较基于相对误差率代价函数的 MPTC 的 THD 降低了 35.05%。在保证电机的动态性能的前提下,提高了电机的稳态控制的性能。证明了本文所提控制策略的可行性

和有效性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

张涛进行了方案设计、内容总结与论文撰写,张涛、高梓伦和李争国进行了仿真研究,孙全增、张志锋参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design, content summary and paper writing were carried out by Zhang Tao. The simulation study was carried out by Zhang Tao, Gao Zilun and Li Zhengguo. The manuscript was reviewed and revised by Zhang Zhifeng and Sun Quanzeng. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] YU F, ZHU Z H, LIU X, et al. Electric-drive-reconstructed onboard charger for solar-powered electric vehicles incorporating six-phase machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 6544-6555.
- [2] CHEN K B, ZHANG Z. In-flight wireless charging: A promising application-oriented charging technique for drones [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2023, 18(1): 6-16.
- [3] 刘伽, 张志锋, 孙全增. 基于混合式脉宽调制的双三相电机谐波抑制技术[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(10): 10-19.
LIU J, ZHANG Z F, SUN Q Z. Harmonic suppression technology of dual three-phase motor based on hybrid pulse width modulation [J]. Electric Machines & Control Application, 2022, 49(10): 10-19.
- [4] 包芳泉. 船舶六相永磁同步电机电流环控制策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2020.
BAO F Q. Research on current loop control strategy of ship six-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020.
- [5] 李耀华, 张鑫泉, 邓益志, 等. 永磁同步电机模型

预测转矩控制客观评价法综述[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(11): 11-21.

- LI Y H, ZHANG X Q, DENG Y Z, et al. A review of objective evaluation method of model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(11): 11-21.
- [6] 陈荣, 翟凯森, 舒胡平. 小偏差永磁同步电机双矢量模型预测控制[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(10): 155-165.
CHEN R, ZHAI K M, SHU H P. Small deviation dual vector model predictive control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(10): 155-165.
- [7] CUI J, KANG M, TAO T, et al. Harmonics suppression for dual three-phase permanent magnet motor with multi-subspace model predictive control [C]//2023 IEEE 6th International Electrical and Energy Conference, Hefei, 2023.
- [8] FU R. Robust predictive current control of dual three-phase PMSM using prediction error correction [C]//2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics, Ji'nan, 2021.
- [9] CORTES P, KOURO S, ROCCA B L, et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives [C]//2009 IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, 2009.
- [10] WANG W S, LIU C H, LIU S Y, et al. Model predictive torque control for dual three-phase PMSMs with simplified deadbeat solution and discrete space-vector modulation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1491-1499.
- [11] LIU Z H, WEI H L, LI X H, et al. Global identification of electrical and mechanical parameters in PMSM drive based on dynamic self-learning PSO [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10858-10871.
- [12] WU H, ZHAO W L, YU M J, et al. Design and simulation of a model predictive control system for a novel dual-rotor flux-switching permanent magnet motor [C]//2021 IEEE International Conference on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics, Ji'nan, 2021.
- [13] HUANG L S, JI J H, ZHAO W X, et al. Direct

- torque control for dual three-phase permanent magnet motor with improved torque and flux [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2385-2397.
- [14] ZHOU H, LI H, XIANG X W, et al. Model predictive control algorithm of dual three-phase motor considering global single vector [C]//2022 25th International Conference on Electrical Machines and Systems, Chiang Mai, 2022
- [15] AGNIHOTRI W, VALENCIA D F, TAHA W, et al. Virtual-flux finite control set model predictive control of dual-three phase IPMSM drives [C]//IECON 2021-47th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Toronto, 2021.
- [16] YANG J R, GONCALVES P F D C, PRADHAN S, et al. A bi-subspace model predictive controller based on incremental model for the dual three-phase PMSM drives [C]//2024 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific, Xi'an, 2024.
- [17] LI Y, MIAO Z C, ZHANG L, et al. Application of finite set model predictive control to five-phase induction motors [C]//2023 5th International Conference on Electrical Engineering and Control Technologies, Chengdu, 2023.
- [18] LI Y Q, ZHANG P, HANG J, et al. Comparison of dynamic characteristics of field oriented control and model predictive control for permanent magnet synchronous motor [C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Wuhan, 2018.
- [19] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 基于模糊控制的动态权重系数表贴式永磁同步电机模型预测转矩控制系统[J]. 电机与控制应用. 2020, 47(3): 1-7.
- LI Y H, QIN H, SU J S, et al. Model predictive torque control of SPMSM with dynamic weight coefficient based on fuzzy control [J]. Electric Machines & Control Application, 2020, 47(3): 1-7.
- [20] 李耀华, 秦辉, 苏锦仕, 等. 永磁同步电机级联模型预测转矩控制优化[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(4): 16-25.
- LI Y H, QIN H, SU J S, et al. Optimization of cascaded model predictive torque control for permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(4): 16-25.
- [21] WU X, ZHANG Y F, SHEN F F, et al. Equivalent three-vector-based model predictive control with duty-cycle reconstruction for PMSM [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 71(3): 2395-2404.
- [22] KHALILZADEH M, VAEZ-ZADEH S. A robust predictive torque and flux control for IPM motor drives without a cost function [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(7): 8067-8075.
- [23] 朱孝勇, 乙峰, 张超, 等. 永磁轮毂电机最优磁链矢量无权重价值函数模型预测转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 736-748.
- ZHU X Y, YI F, ZHANG C, et al. Optimal flux vector model predictive torque control without weighting factor for permanent magnet hub motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 736-748.
- [24] 张平化, 范慧妍, 王爽. 一种改进的双三相永磁同步电机无价值函数模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(5): 30-38.
- ZHANG P H, FAN H Y, WANG S, et al. An improved model predictive torque control for DTP-PMSM without cost function [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 30-38.
- [25] YANG A X, LU Z G. Multiscalar model-based predictive torque control without weighting factors and current sensors for induction motor drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 5785-5797.
- [26] 马红如. 双三相永磁同步电机有限集模型预测转矩控制策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- MA H R. Research on finite control set model predictive torque control for dual three-phase permanent magnet synchronous motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

收稿日期:2025-03-20

收到修改稿日期:2025-05-05

作者简介:

张 涛(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制,18637748979@163.com;

* 通信作者:张 涛(2000-),男,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机控制,18637748979@163.com。